

La lezione

Il peso dell'osservare: il ruolo del soggetto nel Metodo Scientifico

Mario Angelelli

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento

Nel procedere del progresso scientifico, descriviamo i fenomeni o il nostro rapporto con essi? Lungi dal poter dare risposte definitive, questa domanda verrà discussa concentrandosi sul ruolo del soggetto/osservatore nell'ambito del Metodo Scientifico. Si evidenzieranno alcuni esempi di limite alla conoscibilità o comunicabilità dei fenomeni, così come la rilevanza delle assunzioni e il concetto di informazione nell'inferenza di verità scientifiche. Tali limiti possono rappresentare una risorsa, rendendo il Metodo dinamico e adattabile alla creazione di nuova conoscenza.

Limiti alla conoscenza e comunicabilità

Il processo di scoperta e creazione di conoscenza è, implicitamente, un riconoscimento della *manca* di conoscenza. Alcuni aspetti di tale ignoranza, però, possono non dipendere da noi, ma da limiti alla descrizione dei fenomeni, degli eventi e della nostra relazione con essi.

Nel procedere della ricerca, difatti, l'uomo si è spesso trovato davanti a paradossi, a osservazio-

ni in contrasto con ipotesi ritenute valide e basate sul senso di coerenza. Sono emblematiche, a tale riguardo, le due rivoluzioni della fisica moderna: la Teoria della Relatività e la Meccanica Quantistica. Queste teorie hanno certamente risolto delle contraddizioni, ma abbiamo dovuto sacrificare delle certezze che reputavamo stabili. La relatività, ad esempio, ha accordato la meccanica con l'elettromagnetismo, demolendo però il concetto di simultaneità assoluta [1]. È quindi necessario distinguere i limiti della nostra conoscenza attuale, un fattore prettamente umano, da ciò che è intrinsecamente non conoscibile o non comunicabile.

Tale aspetto ha un forte impatto sulla definizione del Metodo Scientifico, poiché sposta l'attenzione dalla descrizione dei fenomeni alla descrizione del nostro rapporto con essi. Nella prima prospettiva, il Metodo descrive il naturale procedere delle scoperte, una procedura coerente per superare i limiti della nostra conoscenza. Tale coerenza non è solo un aspetto interno a una teoria, ma anche legata alle teorie passate: ritornando alla relatività di Einstein, questa supera la fisica Newtoniana, ma non la contrasta. La dinamica di Newton continua a valere con buona approssimazione all'interno di un certo intervallo di valori delle velocità coinvolte. La

teoria pre-relativistica non è quindi sbagliata o incoerente, e può essere vista come un modello-limite della Relatività. In questo caso, dunque, il limite è puramente umano e tecnologico: oggi abbiamo gli strumenti per osservare fenomeni che avvengono ad energie irraggiungibili senza un'adeguata tecnologia.

Discorso analogo vale per gli effetti quantistici, come ad esempio il dualismo onda-particella: esso non contrasta la fisica classica, ma solo la nostra percezione, dove i concetti di particella e di traiettoria sembrano disgiunti da quelli propri dei fenomeni ondulatori. Ciò non vale nel reame quantistico, e tale consapevolezza è arrivata solo quando abbiamo potuto osservare scale spaziali molto più piccole rispetto al mondo umano, macroscopico. Con il supporto della tecnica, quindi ampliamo le nostre capacità di osservazione, ma le nuove teorie contengono quelle passate come modelli efficienti, cioè casi particolari, senza contraddizioni interne.

Tale processo di estensione non è, però, gratis: spesso ci impone di dover sacrificare qualche proprietà desiderabile. Sempre all'interno del reame quantistico, un esempio è quello del principio di indeterminazione di Heisenberg: esistono coppie di osservabili fisiche, come posizione e momento, che non possono essere simultaneamente misurate con un arbitrario grado di precisione. Ciò pone, appunto, un limite alla loro compatibilità. Un limite, questo, intrinseco, non dipendente dall'accuratezza della nostra tecnologia, ma costituente dei fenomeni quantistici.

I fondamenti di tali aspetti controintuitivi possono legarsi ad un'altra accezione di limite alla conoscibilità, che include la possibilità che una visione unificante non esista: che esistano, cioè, molteplici descrizioni dei fenomeni, con aspetti di accordo e altri di contrasto, tutte individualmente coerenti col Metodo Sperimentale, ma mutualmente incompatibili quando considerate insieme.

Un caso emblematico: il paradosso EPR

L'evoluzione dello studio e della riflessione sugli aspetti succitati ha portato a doversi confrontare, oggi, con fenomeni nei quali non è garantito

che un valore di verità di un'affermazione scientificamente verificabile tramite esperimenti sia determinato all'interno di ciò che si osserva. Esso potrebbe, invece, dipendere fondamentalmente dalla relazione tra oggetto e soggetto (chi osserva). Questa soggettività emerge appunto da una pluralità di descrizioni, intese qui come osservazioni che possono essere condotte e validate da esperimenti, e i cui valori di verità non sono necessariamente compatibili.

Per dimostrare quanto possa essere drastico il limite alla conoscibilità dei fenomeni e come questo si ripercuota necessariamente sui concetti di coerenza e valore di verità, fondanti la validità scientifica, ritorniamo alla fisica quantistica e alla sua relazione con le basi della relatività, in particolare la causalità: sistemi separati da una certa distanza non possono influenzarsi istantaneamente. Uno dei primi esempi di incompatibilità tra queste due teorie è stato evidenziato da Einstein che, con Podolsky e Rosen [2], ha costruito un *Gedankenexperiment*, un esperimento mentale. I postulati da cui partivano i tre fisici erano, anch'essi, tre:

- **località** (legata alla causalità): l'influenza di un sistema su un altro sistema distante si propaga a velocità finita (limitata, cioè, da quella della luce);
- **realismo**: se possiamo predire con certezza il valore di una quantità fisica senza perturbare il sistema, allora esiste un corrispondente elemento di realtà fisica, vale a dire una proprietà oggettiva del sistema, indipendente dall'osservatore;
- **completezza**: ogni elemento di realtà fisica ha una controparte nella teoria – cioè, la teoria contiene le entità e l'informazione necessaria per descrivere la realtà fisica.

Nel loro esperimento mentale, EPR hanno mostrato come le previsioni della fisica quantistica, in particolare l'indeterminazione di Heisenberg, fossero incompatibili con queste tre assunzioni prese simultaneamente: da ciò, appunto, il Paradosso EPR. Quindi, i postulati sono troppo stringenti e, per mantenere la coerenza interna, qualcosa deve essere sacrificato. L'approccio EPR era quello di sacrificare la completezza, dato che località e realismo non erano messi in discussione.

Ciò ha ventilato l'ipotesi dell'incompletezza della teoria quantistica e dell'esistenza di alcune variabili nascoste che completassero l'informazione sul sistema.

Qualche anno dopo, John Bell [3] ha dimostrato un insieme di proprietà che devono essere soddisfatte da alcune quantità in un sistema con località, realismo e variabili nascoste: queste quantità sono note come le disuguaglianze di Bell. Ecco, le teorie quantistiche violano queste disuguaglianze.

Cosa possiamo trarne? In primo luogo, che non tutta l'incertezza è probabilità. Le probabilità di eventi congiunti appartenenti a un medesimo spazio degli eventi devono soddisfare certe relazioni, ma le correlazioni quantistiche sono un esempio di fenomeno che sfugge a una descrizione classica tramite probabilità. In secondo luogo, si deve rinunciare all'insieme dei tre postulati succitati e, almeno per questo tipo di sistemi, accettare l'innegabile legame tra osservatore e osservato, tra soggetto e oggetto, almeno in certi sistemi fisici¹.

Il ruolo delle ipotesi: soggettività e oggettività, locale e globale

La rilevanza dell'osservatore non è una novità nell'ambito del Metodo Scientifico. La stessa relatività (di Galileo prima, di Einstein poi) ci dice come le descrizioni varino al variare del sistema di riferimento. Tale dipendenza dalla prospettiva dell'osservatore non è però da intendersi come un cambiamento arbitrario. Tutt'altro, esso è un modo di descrivere il cambiamento della descrizione dei fenomeni in modo tale da preservare le leggi fisiche nei singoli sistemi di riferimento. Questo cambiamento è determinato da leggi ben precise: un osservatore può scegliere di adottare un sistema di riferimento o un altro, ma la relazione tra le due descrizioni che derivano è ben definita² e non è ambigua. È poi l'esperimento, definito da una procedura chiara e comunicabile per garantirne la riproducibilità, che permette di validare o falsificare una teoria. Tale riproducibi-

lità fa sì che ciò che rileva un osservatore, a livello statistico e al netto delle incertezze sperimentali (fattori contingenti), sia compatibile con ciò che rileva un altro osservatore nelle stesse condizioni. Dopo aver scelto di condurre un esperimento, si otterrà un valore di verità classico, vero o falso, per espressioni relative a fenomeni verificabili come, ad esempio, un fotone è stato rilevato da un apparato sperimentale).

Tale discorso, però, poggia su diverse ipotesi di fondamentale importanza, fra le quali spiccano la scelta dell'esperimento da svolgere e il suo effettivo svolgimento: ipotesi che, nella loro semplicità, hanno effetti sorprendenti nell'estrazione di informazione e conoscenza all'interno del processo scientifico. Anche in questo caso, il reame quantistico offre esempi di profondo valore: la scelta dell'esperimento da svolgere si traduce nel considerare una molteplicità di osservabili fisici, così come le relazioni di compatibilità e incompatibilità tra di essi. La dipendenza degli esiti delle misurazioni da tale scelta va sotto il nome di contestualità, formalizzata nell'impossibilità di assegnare valori di verità a delle proprietà osservabili sperimentalmente in modo univoco e indipendente dalla scelta dell'insieme di proprietà da osservare (il contesto) [4]. A sua volta, nei fenomeni quantistici la contestualità si lega alla seconda assunzione, la realizzazione dell'esperimento, nella forma di non-controfattualità [5]: solo gli esperimenti effettuati hanno un definito valore di realtà.

L'entità e il ruolo dell'osservatore sono quindi diversi nel caso della relatività e in quello quantistico. In relatività, la dipendenza è il risultato di assunti fondamentali che affermano l'equivalenza delle leggi fisiche in sistemi equivalenti. Le leggi che traducono la descrizione di un fenomeno da un sistema di riferimento all'altro emergono, di fatto, allo scopo di preservare dette leggi fisiche.

Nell'ambito quantistico, invece, la dipendenza dall'osservatore non risiede tanto nella scelta delle coordinate, quanto nella definizione dei valori di verità in sé: tanto la scelta di cosa osservare (il contesto) quanto quella di osservarla (non-controfattualità) contribuiscono a determinare gli esiti di un esperimento e le proprietà che si osservano. Ciò evidenzia un livello più profondo di indeterminazione, non legato a una

¹Chiaramente, l'entità di questa dipendenza ci è relativamente nascosta a livello macroscopico.

²Le trasformazioni di Lorentz nel caso della Relatività Speciale, i diffeomorfismi nel caso della Relatività Generale.

diversa scelta di scale o coordinate, né all'uso delle probabilità³, ma intrinseco nel rapporto tra sistema osservato e osservatore.

Lungi dall'essere una speculazione, lo studio dei fatti accessibili a diversi osservatori è uno degli ambiti di grande dibattito nelle teorie fisiche, oltre ad essere una bussola verso la definizione di esperimenti che possano validarle o falsificarle empiricamente. Un esempio paradigmatico è fornito da una semplice domanda sul senso delle osservazioni e delle misurazioni, concetti primari nel Metodo Scientifico: un primo osservatore conduce un esperimento in un laboratorio, e un secondo osservatore, dall'esterno, sa che tale esperimento è stato condotto ma non ne conosce l'esito. Su tali basi, entrambi possono misurare delle quantità relative allo stato che osservano: che risultati possono trarne? Tale quesito è la base per un ulteriore esperimento mentale, condotto da Wigner (e da un suo amico [6]). Anche in questo caso, si dimostra l'impossibilità di assegnare valori di verità univoci relativi a proprietà osservate dai due osservatori, se si assumono ulteriori criteri come la già citata località e la libertà di scegliere l'esperimento da effettuare. Come anticipato, la rilevanza di tali riflessioni trascende gli aspetti concettuali e si riflette nella concreta definizione di misurazioni da effettuare: recenti esperimenti [6] supportano i risultati di Wigner e, quindi, l'inevitabile ruolo del soggetto nella co-definizione delle proprietà osservate.

È in questo passaggio, da locale, il singolo soggetto, a globale, una molteplicità di possibili soggetti, scelte ed osservazioni, che si esce fuori dai reami della logica classica.

Oltre la logica standard

La discussione precedente porta a una riflessione su cosa intendiamo come valore di verità. Ciò non coinvolge esclusivamente il valore in sé⁴, ma pure il modo che qualifica tali valori (necessità e possibilità), la loro combinazione tramite con-

nettivi logici, se possono essere combinati⁵, e il processo operativo tramite il quale sono ottenuti, aspetto base di ogni metodo scientifico.

Quanto detto in precedenza non è teso a ridurre valore al metodo scientifico sperimentale: al contrario, andando a considerare i limiti e l'applicabilità del metodo, si possono rendere esplicite la dipendenza dalle ipotesi fatte dall'osservatore e il peso della sua informazione pregressa, tanto nella formulazione di un'ipotesi quanto nella scelta di un esperimento che permetterà di validarla, come è evidente nel succitato esperimento di Wigner.

L'informazione condivisa da due osservatori, rappresentata dalla consapevolezza di aver adottato presupposti comuni, diventa un fattore implicito, ma fondamentale, per trarre conclusioni comuni. La mancanza di una base di conoscenza comune può portare ai risultati dedotti da Wigner e verificati empiricamente. Ancora, la già citata contestualità porta due osservatori ad adottare contesti di misurazione compatibili per poter assegnare valori di verità compatibili, quindi a sapere (o concordare) che tipo di esperimento verrà condotto, e la non-controfattualità si lega all'effettiva realizzazione di una tale misurazione.

È quindi evidente che esistano delle basi oggettive attraverso le quali progredire nella conoscenza un esperimento è un protocollo, un algoritmo riproducibile, e due osservatori che seguano lo stesso protocollo, statisticamente, arriveranno a risultati compatibili. Ma, quando si riflette sul metodo di scoperta scientifica, è bene chiedersi cosa renda oggettivi tali presupposti. L'oggettività, nei casi esposti in precedenza, emerge anche dalla condivisione dei presupposti da parte dei diversi soggetti, che comunicano e condividono ciò che rappresenta l'input, l'istanza di questo algoritmo. In questo modo, l'oggettività del dato si combina con la soggettività dell'informazione, passaggio fondamentale nella creazione di nuova conoscenza.

Più in generale, la riflessione sulle ipotesi, implicite e spesso ovvie, e sui processi logici adottati nella ricerca di verità e di coerenza all'interno di una teoria scientifica, si rivela spesso fonte e propulsione di nuova scienza. Un esempio pri-

³L'oggetto che racchiude l'informazione sul sistema quantistico evolve deterministicamente: formalmente, una funzione d'onda che evolve secondo l'equazione di Schrödinger.

⁴Anche oltre i valori classici, come si usa nell'ambito delle logiche multi-valore o *fuzzy*.

⁵La già citata incompatibilità tra osservabili fornisce un esempio di incompatibilità nella combinazione di asserzioni.

mario è quello del più semplice contare: ciò che si osserva negli esperimenti che possono essere trattati in maniera quantitativa sono, d'altronde, numeri di eventi. Operativamente, la probabilità entra in gioco in termini di frequenze empiriche relative a un certo evento. Il conteggio, l'aritmetica che apprendiamo alle scuole elementari, è oggettivo nella misura in cui ne condividiamo assiomi e interpretazioni [7], ma ha implicazioni per nulla banali quando si esplora la portata di tali assiomi. Fu Gödel a mostrare che una teoria logica formale, se abbastanza strutturata da poter costruire la semplice aritmetica che si apprende nei primi anni di scuola, avendo quindi le basi per contare, non può essere contemporaneamente non-contraddittoria e completa: in pratica, non tutte le espressioni logiche possono essere dimostrate.

I concetti di verità e di dimostrabilità, quest'ultima legata a un processo operativo, si scindono. Tale passaggio apre un'altra prospettiva sul Metodo, se consideriamo una proprietà giustificata solo dall'esistenza di una dimostrazione, oppure se si richiede l'effettiva costruzione di una dimostrazione. Le ripercussioni pratiche sono profonde: un simile approccio intuizionista è essenziale nella costruzione di algoritmi [8], ma fa perdere un postulato base della logica standard, ossia il fatto che ogni affermazione possa essere o vera o falsa, *tertium non datur*.

Anche in questo ambito, l'esplorazione dei limiti di una teoria, o della sua incompletezza, si può quindi rivelare una risorsa, in particolare quando entra in gioco l'emulazione della cognizione umana, l'Intelligenza artificiale [9, 11, 10]. Lungi dall'essere una mera questione sintattica, difatti, i risultati di Gödel si legano al problema della computabilità di Turing, e la teoria delle dimostrazioni logiche ai linguaggi di programmazione [12, 8].

Come si legano tali discorsi, puramente formali, con il metodo scientifico sperimentale? Parlando di verità e coerenza, dobbiamo tenere in conto che il nostro calcolo logico standard possa non aderire pienamente ad un particolare sistema fisico. Per fornire un caso concreto, partiamo da una forma di ragionamento in cui alcune asserzioni si possono assimilare a risorse che si consumano, e come tali non utilizzabili indiscriminatamente nell'inferenza di altre asserzioni. Un esempio

tipico sono le espressioni

"Con 1 € posso comprare un caffè"

e

"Con 1 € posso comprare una bottiglia d'acqua".

Se è possibile combinare queste due frasi in

"Con 1 € posso comprare un caffè e con 1 € posso comprare una bottiglietta d'acqua",

non è possibile combinarle per inferire che

"Con 1 € posso comprare un caffè e una bottiglia d'acqua".

Le logiche substrutturali che ne derivano, come la logica lineare [13]⁶, entrano nel metodo sperimentale permettendo di trattare peculiari fenomeni fisici con un linguaggio adeguato: anche qui rientrano i processi quantistici, data la struttura che definisce il modo in cui essi si combinano [14].

Il peso dell'informazione e delle ipotesi

La crescente rilevanza del ruolo dell'osservatore e delle sue ipotesi di lavoro nei moderni sviluppi scientifici porta a definire strumenti per poter evidenziare e trattare il concetto di informazione e la sua evoluzione, da *a priori* ad *a posteriori*. È interessante che ci venga in aiuto il concetto di entropia, originato in termodinamica e alla base dell'introduzione della probabilità e della statistica in fisica: la nostra ignoranza sulle condizioni dei fenomeni microscopici, l'ipotesi di caos molecolare di Boltzmann [15], un aspetto pertanto legato all'informazione accessibile all'osservatore umano, è fondamentale nel dimostrare come quella quantità che chiamiamo entropia cresca nel tempo. Il fluire del tempo macroscopico è, quindi, fondamentalmente collegato alla descrizione che l'osservatore dà del fenomeno, al suo livello di conoscenza. Ad esempio, perché vediamo una goccia di colore diluirsi in un bicchiere d'acqua, ma non ci capita di vederla concentrarsi nuovamente in un unico punto?

Oggi, questa nozione ha trascorso la sua accezione originaria: a partire dai legami tra entropia fisica (irreversibilità fisica) ed entropia d'infor-

⁶La logica lineare di Girard è stata anche utilizzata nella costruzione della nuova blockchain Libra, si veda The Libra Blockchain, <https://developers.libra.org/docs/assets/papers/the-libra-blockchain.pdf>.

mazione (irreversibilità logica)⁷, il concetto di entropia, declinato appropriatamente in diversi ambiti, è diventato uno strumento fondamentale nello studio dell'informazione [11] e del suo lato oscuro, l'incertezza con cui ogni forma di scienza deve confrontarsi.

È in questa prospettiva che il metodo dimostra ancora il suo valore: la chiarezza e la comunicabilità di un esperimento, in particolare, sono quell'informazione che, scambiata tra i diversi soggetti, permette di trarre conclusioni compatibili. Tale scambio di informazione non viola la causalità (avviene a velocità non superiori a quella della luce), il che risolve, in parte, il paradosso EPR, dato che il solo atto della misurazione non può essere usato per comunicare informazione⁸. Non si tratta, quindi, di vedere il metodo come sola convenzione, ma di riconoscerne il contributo essenziale nel progresso scientifico, nel passaggio dal dato all'informazione, e poi alla conoscenza.

Se l'entropia può essere uno strumento per estrarre il contenuto informativo, il peso delle proprie assunzioni risalta quando abbiamo vari modelli, tutti compatibili con i dati sperimentali e le osservazioni ad oggi disponibili. Una buona prassi in questi casi è suggerita dal Principio delle spiegazioni multiple di Epicuro [17]:

"Se più teorie sono consistenti con i dati, dovrebbero essere tutte mantenute".

Nel confronto tra tali modelli, si può argomentare come le ipotesi assumano un vero e proprio peso a partire da un principio pragmatico, il rasoio di Occam:

"È futile fare con più mezzi ciò che si può fare con meno".

Tale principio deve però essere inteso (citando Einstein) senza dover rinunciare alla rappresentazione di un singolo dato di esperienza. È su questo vincolo, l'aderenza ai fatti, che si può valutare la semplicità. Dopo aver considerato ciò che è certo (i dati), resta però l'incerto. Il concetto di semplicità di Occam emerge quando ci si chiede perché, tra i possibili esiti di un esperimento, sia uscito proprio quello che è uscito.

⁷La cancellazione di un bit, un processo logico irreversibile, comporta un costo di entropia, legato all'irreversibilità. Si veda [16].

⁸Per la formalizzazione di tale concetto, si rimanda al *no-communication theorem* e a diversi altri teoremi *no-go* relativi all'informazione quantistica [5].

Qui entra in gioco la scelta del modello, che può essere trattato, ad esempio, attraverso l'inferenza Bayesiana [10], la quale permette di quantificare tanto il peso delle nostre ipotesi, quanto la loro evoluzione in risposta ai nuovi dati. In questo formalismo, il rasoio di Occam può essere tradotto con strumenti formali, e si trova che, a parità di spiegazione dei fenomeni osservati, un modello più semplice (ad esempio, con meno parametri liberi da poter aggiustare per adeguarsi ai dati) concentra maggiormente le sue predizioni su quanto osservato.

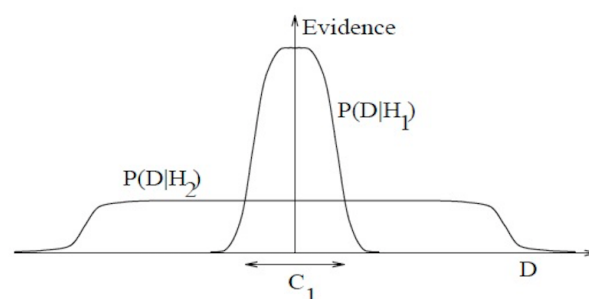


Figura 1: Il modello H_1 , più semplice, spiega meglio i dati osservati, nella regione C_1 . Figura estratta da [10].

Anche qui, il rapporto tra soggetto e oggetto è fondamentale: un approccio troppo oggettivo si adagia sui dati osservati, riducendo così il potere di predire fenomeni; un approccio troppo soggettivo esclude il valore dei dati. La virtù, come spesso accade, sta nel mezzo, nel *trade-off* tra tali prospettive.

Conclusioni: libertà di scelta

Anche le Scienze Naturali, quelle più adatte alla formulazione del metodo Galileiano, oggi includono fenomeni nei quali la relazione tra fenomeno osservato, contesto e osservatore è fondamentalmente diversa rispetto a quella che poteva osservare Galileo. Oggi, infatti, possiamo osservare una varietà di fenomeni che sfuggono ad un approccio riduzionista (come modelli relazionali e complessi) e necessitano di adeguati processi e linguaggi logici.

Esistono quindi molteplici Metodi Scientifici, chiari e coerenti nelle loro formulazioni, che non sono sistemi chiusi, ma interagiscono tra di loro e si alimentano in una continua evoluzione. Ciò include anche alcuni modelli fuori dalle Scienze

Naturali, che da una parte possono trarre giovamento da strumenti analitici e quantitativi, e dall'altra possono contribuire a definire modelli utili nelle Scienze Naturali, come dimostra l'apporto dato dallo studio delle reti sociali alla teoria dei sistemi complessi.

In tutti questi ambiti di ricerca, è necessario convivere con diverse forme di incertezza, e i limiti dati dalle proprie ipotesi di lavoro portano a non escludere nulla a priori: questo vuol dire che tutto è valido? È qui che entra in gioco il passaggio da informazione a conoscenza: nella capacità di discernere. Ponderare, nel vero senso del termine: dare un peso ai modelli e alle ipotesi che si fanno, il che vuol dire, *in primis*, esserne coscienti.

Molti degli spunti trattati - la molteplicità di modelli, la computabilità, la compatibilità col dato oggettivo, la consapevolezza del peso dei propri assunti con adeguati strumenti per evidenziarne il contenuto informativo, l'evoluzione di tali pesi sulla base delle nuove osservazioni - sono gli ingredienti alla base dei primi modelli di intelligenza artificiale [9], ma potrebbero anche essere il valore intrinseco, le basi comuni ai diversi metodi scientifici, nei vari ambiti di ricerca e scoperta della conoscenza dell'uomo. In questo, la libertà di scelta di ciò che si osserva è fondamentale, ma comporta una responsabilità: essere consapevoli delle proprie assunzioni e non sprecare" un singolo dato, un singolo fatto. "Ciò che non è assolutamente possibile è non scegliere" [18]: quest'atto di scelta è un impegno, e ciò non riguarda solo il metodo, ma molti degli aspetti del vivere umano.

Questa lezione è stata presentata il 25 febbraio 2019 all'ISUFI nell'ambito dei seminari del *Laboratorio didattico ISUFI sul metodo scientifico*.



- [1] T. A. DEBS, M. L. REDHEAD: "The twin paradox and the conventionality of simultaneity", *Am. J. Phys.* **64** (1996) 384.
- [2] A. EINSTEIN, B. PODOLSKY, N. ROSEN: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Phys. Rev.* **47** (1935) 777.
- [3] J. S. BELL: "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox", *Physics* **1** (1964) 195. J. S. Bell, *Speakable and unspeakable*

in Quantum Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge UK (1987).

- [4] S. KOCHEN, E.P. SPECKER: "The problem of hidden variables in quantum mechanics", *J. Math. Mech.* **17** (1967) 59.
- [5] A. PERES: *Quantum theory: concepts and methods*, Vol. 57. Springer Science & Business Media, New York (2006).
- [6] M. Proietti et al. (2019). Experimental rejection of observer-independence in the quantum world, *ArXiv preprint: arXiv:1902.05080*.
- [7] G. PEANO: *Arithmetices principia: nova methodo exposita*. Fratres Bocca, Roma (1889).
- [8] J.-Y. GIRARD, P. TAYLOR, Y. LAFONT: *Proofs and types*. Cambridge University Press, Cambridge UK (1989).
- [9] R. J. SOLOMONOFF: "A formal theory of inductive inference", *Inform. control* **7** (1964) 1., *ibidem* **7** (1964) 224.
- [10] D. J. C. MACKAY: *Information theory, inference and learning algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge UK (2003).
- [11] E. T. JAYNES: *Probability Theory - The Logic of Science*, G. L. Bretthorst (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge UK (2003).
- [12] G. GENTZEN: *The collected papers of Gerhard Gentzen*. North-Holland, Amsterdam (1969).
- [13] J.-Y. GIRARD: "Linear logic", *Theor. Comp. Sci.* **50** (1987) 1.
- [14] B. COECKE (ED.): *New Structures for Physics*. Lecture Notes in Physics, Springer, Berlino (2011).
- [15] P. EHRENFEST, T. EHRENFEST: *The conceptual foundations of the statistical approach in mechanics*. Courier Corporation, North Chelmsford, Massachusetts, USA (2002).
- [16] R. LANDAUER: "Irreversibility and heat generation in the computing process", *IBM J. Res. Dev.* **5** (1961) 183.
- [17] E. ASMIS: *Epicurus' Scientific Method*. Cornell Univ. Press, Ithaca, NY, USA (1984).
- [18] J. P. SARTRE: *L'esistenzialismo è un umanismo*. traduzione di G. Mursia Re, Mursia, Milano (1990).



Mario Angelelli: assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento, si occupa della definizione di modelli algebrici e strumenti statistici per l'inferenza applicati a sistemi fisici.

